



4^{to} Congreso Argentino de Ingeniería Aeronáutica



ESTUDIO EXPERIMENTAL DE SISTEMAS ACUMULADORES ANTIPOGO.

J.D. Lavirgen, A. Scarabino

Dpto. de Ing. Aeronáutica., Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. Calle 116 e/ 47 y 48 (1900) La Plata, Prov. de Buenos Aires, Argentina. <http://www.ing.unlp.edu.ar>

Palabras claves: Acumulador, POGO, Experimental

Resumen

Los sistemas Antipogo son utilizados a fin de mitigar los acoplamientos de frecuencias naturales de las líneas de propulsión con las de la estructura que contiene al conjunto. Si este acoplamiento no es mitigado o amortiguado pueden ocurrir eventos dinámicos en donde la amplitud de las oscilaciones llega a valores extremos pudiendo generar la falla del mismo.

El método utilizado en el diseño de lanzadores espaciales para separar las frecuencias de los sistemas mencionados es la implementación de un cilindro paralelo a las líneas principales de propulsión. Este dispositivo almacena un gas inerte que se comprime cuando la presión del ducto aumenta abruptamente. De esta manera las perturbaciones de caudal ocurridas son absorbidas al reducir el volumen del gas y no generan esfuerzos sobre la estructura que la contiene.

El Grupo de Fluidodinámica Computacional del departamento de Aeronáutica, FI UNLP trabaja en una línea de investigación centrada en el estudio de interferencia fluido-estructural. Entre otros temas, se estudian los eventos de POGO que pueden darse en vehículos lanzadores, calculando los modos naturales del fluido y las perturbaciones que pueden introducir las máquinas rotantes tales como turbobombas. Como resultado de tales desarrollos se realizó también el diseño de los dispositivos acumuladores y los estudios experimentales correspondientes que se presentan en este informe.

Para complementar los cálculos teóricos se diseñó y ensambló un banco de pruebas de acumuladores que pretende estimular modos de fluido y estructurales en un conducto vertical. Una vez caracterizadas las oscilaciones naturales, se busca mitigar las mismas con el acoplamiento de un dispositivo acumulador paralelo. De esta manera y utilizando sensores de presión de alta frecuencia se logró caracterizar la dinámica del fluido bajo funciones escalón o golpes de ariete. Una vez realizado esto se activó el acumulador y se evidenciaron los cambios en dicha dinámica. Así se determinaron los cambios producidos por la presencia del mismo en el evento. Además, se validó un cálculo de sintonización del elemento, que actúa como filtro pasa bajos y se propusieron varias secuencias de armado y presurizado del conjunto.

Para la planificación de los trabajos futuros se recomiendan algunas modificaciones del banco. Las mismas buscan ampliar las capacidades del sistema para detectar fehacientemente modos de acoplamiento fluido estructural en un espectro amplio de frecuencias.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de conductos que alimentan a un motor de combustible líquido pueden tener problemas de vibraciones debido a una interacción entre la dinámica de la estructura y la del flujo de propelente u oxidante. Cuando ocurren oscilaciones de presión en el fluido, las mismas generan perturbaciones de caudal en peso (consideración de la masa que comprende una porción de caudal) que son esfuerzos externos sobre el piping que los contiene y pueden llevar al sistema a una realimentación oscilatoria o resonancia conocida como evento de “Pogo”. Para evitar este suceso, se pueden utilizar un acumulador en el cual interactúan una porción de líquido, proveniente de la misma línea de propulsión y una porción de gas, inyectado en una etapa de presurización a una línea paralela aislada. Al variar los parámetros de presurizado del acumulador se puede corregir la sintonización del mismo y así obtener una dinámica del sistema total que evite los acoplamientos fluido-estructurales. Las vibraciones de los caños que transportan los fluidos, dependen de la rigidez de cada componente y de los anclajes al vehículo, así como también de la masa que representa cada elemento. En el caso de los fluidos, la dinámica está representada por las perturbaciones de caudal y están relacionadas con parámetros de elasticidad e inercia del fluido, los cuales dependen de la porción de líquido que hay en cada elemento. Al sistema de propulsión se le pueden adherir fases gaseosas semiaisladas que compartan los niveles de presión, pero no los de caudal y volumen. De esta forma se pueden establecer absorbedores dinámicos paralelos a las líneas de combustible y oxidante [1].

Para evidenciar los fenómenos oscilatorios por interacción dinámica se realizaron una serie de ensayos en los cuales se pone en juego la dinámica estructural, fluidodinámica y el funcionamiento de un acumulador. Se diseñó e instalo un banco de oscilaciones al cual se le añadió un puerto de comunicación con un acumulador. El mismo cuenta con la capacidad de ser activado y desactivado según lo que se esté estudiando y está previsto para llevar a cabo varios métodos de presurización.



Figura 1: Banco de ensayos de acumulador.

Concepto

El estudio teórico de la inestabilidad se centra en evaluar el acoplamiento de los dos sistemas dinámicos ya definidos. El fenómeno ocurre cuando las frecuencias naturales de ambos son cercanas y el acoplamiento entre ambos es favorable a la resonancia. Esto quiere decir que si la interacción entre las partes, en presencia de un modo natural de acoplamiento, no presenta grandes componentes de amortiguamiento (viscoso) se produce una amplificación de los desplazamientos, caudales y presiones de cada elemento de manera divergente y las probabilidades de falla pueden aumentar poniendo en riesgo la misión llevada a cabo. De esta manera, cada uno de los sistemas puede estudiarse bajo modelos discretizados en masas resortes y amortiguadores. En el caso del modelo que representa a la estructura los coeficientes de cada término en la ecuación diferencial dependen de la discretización de la masa de secciones particulares, de la elasticidad estructural de los elementos que los componen y de los parámetros de amortiguamiento interno del material. Por otro lado, los coeficientes de los cuales depende el modelo del fluido dependen de la cantidad de líquido presente sección, de la geometría de los conductos y de la elasticidad que presentan los mismos en la dirección radial.

Para poder determinar los posibles acoplamientos que puede haber en cada caso, es necesario poder caracterizar cada una de las dinámicas. Por un lado, la estructura puede evaluarse utilizando varios métodos. Generalmente se aplican cálculos en elementos finitos en software desarrollados de estructuras (Abaqus, CATIA, Nastran, Ansys, etc.) aunque pueden realizarse estimaciones simples a partir de cálculos convencionales que arrojen los primeros modos ya que, al comprender desplazamientos longitudinales, suelen ser suficientemente altos. Por otro lado, la determinación de los modos de la parte fluida se ha realizado a partir del método que propone Rubbin en donde se utilizan ecuaciones diferenciales de segundo orden en las variables presión y caudal en peso (**RUBIN, 1993**).

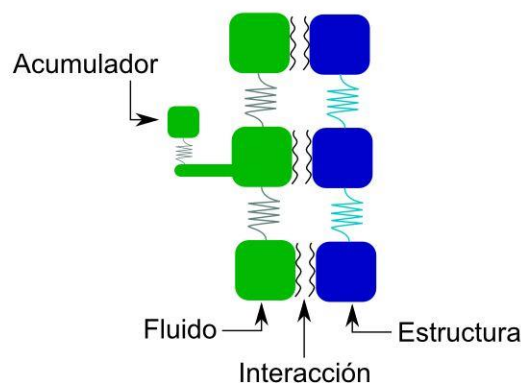


Figura 2: Concepto representativo de las interacciones dinámicas del fluido y la estructura.

En el análisis dinámico de la fluidodinámica tanto los tanques, como el piping, las bombas, los inyectores y el motor deben ser considerados a la hora de evaluar la discretización del sistema y todos ellos poseen una ecuación diferencial particular. Es decir, que para obtener un resultado confiable de los modos naturales es necesario tener definidas tanto las geometrías como los regímenes de trabajo de cada componente. El estado del combustible y el oxidante en cada elemento es líquido (Excepto en los alabes de turbobomba donde puede darse la cavitación). Esto quiere decir que los parámetros de rigidez de cada uno de ellos son elevados, ya que prevalece la elasticidad en deformación radial de los caños. Esta característica trae aparejada que los modos naturales propios de cada elemento y del sistema en general sean altos y de una ganancia considerablemente alta. Para poder eliminar todos estos modos es necesario colocar un filtro pasabajo que atenúe o elimine los picos del espectro. Cuando colocamos una fase gaseosa en el sistema, que pueda comprimirse de manera más sencilla que lo que permite la rigidez de las tuberías, los picos de presión y caudal que viajan por el piping como perturbaciones son absorbidos comprimiendo esos volúmenes y derivados a una línea paralela. Con este fin se añade un cilindro que aloja un volumen de gas separado con una membrana permitiéndole interactuar con las cañerías principales desde una posición paralela. Este elemento se conoce como acumulador. Además, cuenta con dos válvulas de armado. Una controla el paso de gas a un botellón cisterna y otra el paso de combustible a la línea principal. La cisterna de gas utilizada puede provenir del sistema de presurización general si se cuenta con el regulador de presión y caudal

adecuado. Otra de las opciones es proveer un botellón independiente que aloje el volumen total precalculado y que luego debe ser compartido con el volumen del acumulador.

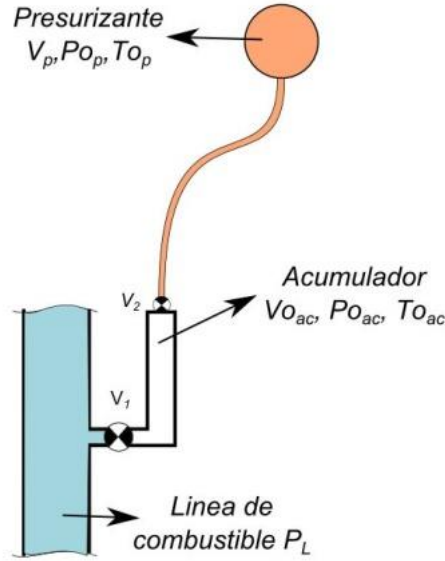


Figura 3: configuración de conexiones de acumulador y línea principal

Para poder sintonizar el dispositivo como mitigador de las frecuencias se debe recurrir al análisis matemático de la dinámica del mismo.

El sistema se modeliza en una ecuación de segundo orden cuya variable principal es el caudal en peso de fluido. La misma se puede analizar como sistema masa-resorte-amortiguador en la cual la masa está compuesta por la columna de fluido, el resorte por el gas comprimido y el amortiguador por la viscosidad del fluido en contacto con el cilindro. En la siguiente ecuación las variables de perturbación ω y p representan el caudal en peso y la presión interna del acumulador.

$$p_{ac} - R_{ac}\dot{w}_{ac} - I\ddot{w}_{ac} - K_{ac}w_{ac} - \rho\vec{H}_{ac} \cdot \ddot{\vec{r}} = 0 \quad (1)$$

Los coeficientes de cada término son respectivamente:

- R_{ac} = Resistencia del dispositivo. Dependiente de la caída de presión por viscosidad en el acumulador y en el puerto para un caudal estable. Ya que la velocidad del fluido en esta zona es muy baja para bajas frecuencias y al no haber desplazamiento en altas, este valor es muy pequeño.
- I_{ac} = Inertancia del dispositivo. Dependiente de la geometría del cilindro y de la columna de agua presente en el mismo.

$$I_{ac} = \int_0^l \frac{d(l)}{A(l)g} \quad (2)$$

- K_{ac} = Elasticidad del acumulador. Dependiente de la compresión del volumen de gas contenido.

El último término de la ecuación introduce la información del movimiento del dispositivo en un modo determinado del sistema estructural, Para realizar el análisis del sistema de fluido no lo tendremos en cuenta, pues suponemos que la vibración del conjunto es nula.

$$K_{ac} = \frac{\gamma P_s^2 T_o}{\rho_w P_o V_o T_s} \quad (3)$$

La función de transferencia entre la variable de caudal en peso y la presión en la entrada del acumulador queda establecida de la siguiente manera:

$$G_{ac} = \frac{\dot{w}_{ac}}{p_{ac}} = \frac{\dot{w}_{ac}}{I_{ac}\dot{w}_{ac} + R_{ac}\dot{w}_{ac} + K_{ac}w_{ac}} \quad (4)$$

Transformado del campo temporal al campo de frecuencias se llega a:

$$G_{ac}(s) = \frac{sW_{ac}(s)}{s^2 I_{ac}W_{ac}(s) + sR_{ac}W_{ac}(s) + K_{ac}W_{ac}} \quad (5)$$

$$G_{ac}(s) = \frac{s}{I_{ac}(s^2 + s\frac{R_{ac}}{I_{ac}} + \frac{K_{ac}}{I_{ac}})} \quad (6)$$

Comparando con el denominador para la dinámica de sistemas de segundo orden, es decir:

$$\frac{1}{b_1(s^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2)} \quad (7)$$

Se llega a:

$$\begin{cases} \omega_{ac}^2 = \frac{K_{ac}}{I_{ac}} \\ 2\zeta\omega_{ac} = \frac{R_{ac}}{I_{ac}} \end{cases} \quad (8)$$

La gráfica de ganancia vs frecuencias de un sistema de segundo orden tiene el aspecto que se ve en la Figura 4. En el proceso de diseño y sintonización se busca adaptar este gráfico a las condiciones que sean necesarias. Generalmente se busca que el pico resonante se ubique en la frecuencia que se necesita absorber de la línea principal y que es susceptible a generar resonancias. Buscando este resultado, la energía de la perturbación que viajaría por la línea principal desarrolla oscilaciones de caudal en el acumulador que comprime el gas y protege al sistema de propulsión.

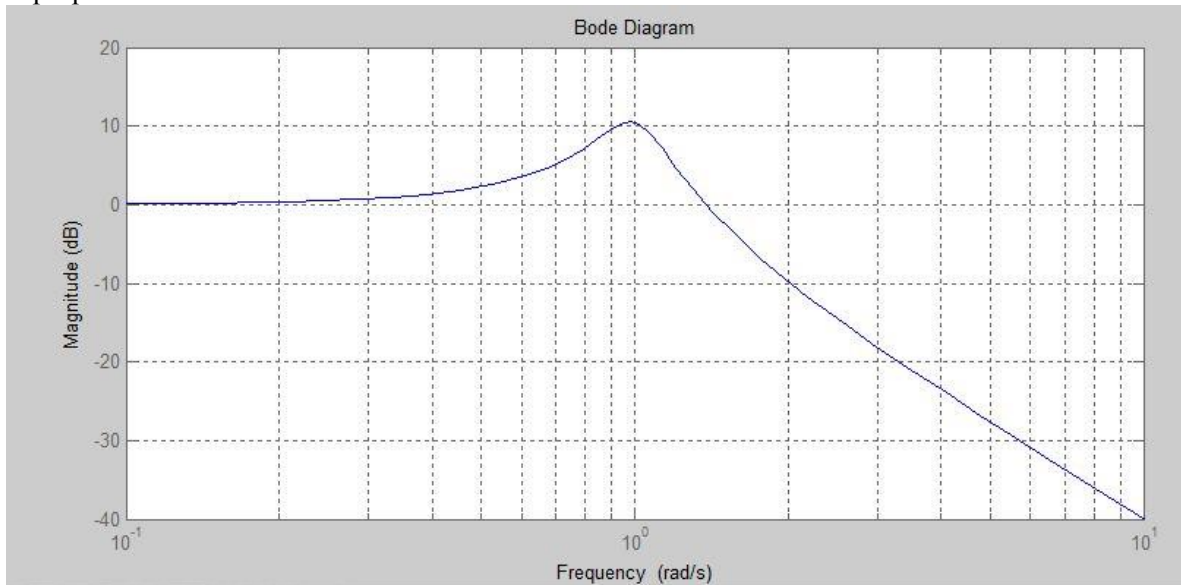


Figura 4: Gráfico de bode de un sistema típico de segundo orden.

Desarrollo experimental

Los ensayos llevados a cabo tienen el objetivo de visualizar la interacción estructural-fluidodinámica en una tubería que no está rígidamente anclada, es decir, que presenta una gran flexibilidad de movimiento. Además, se busca visualizar el comportamiento de un acumulador sintonizable bajo diferentes secuencias de armado. Para esto se plantea la conformación de un banco de ensayos en donde se pueden medir las perturbaciones de presión del fluido y de desplazamiento de la estructura que lo contiene.

Se llevaron a cabo mediciones en distintas condiciones de contorno estructural variando la posición de uno de los puntos de anclaje. La perturbación del flujo genera cambios en la presión total cuyo transitorio se da de manera oscilatoria. Con estos ensayos se obtuvieron las frecuencias naturales de cada sistema y se reconocieron las condiciones que debían darse para promover el acoplamiento dinámico.

El banco está constituido por una tubería principal que descarga agua desde un tanque superior en uno inferior por acción de la gravedad y cuyo caudal puede ser cortado por el cierre de una válvula colocada en el extremo de salida. Al mismo caño se le añadió un puerto que comunica con un acumulador a través de una válvula on-off de manera que el mismo pueda ser activado o desactivado.

El primer modo de oscilación del caudal en peso está determinado por la expresión

$$w = \sqrt{\frac{K_{ac}}{I_{ac}}} \quad (9)$$

La configuración de la cañería busca poder establecer una tubería principal en la cual se medirán presiones y aceleraciones. La esbeltez de esta asegura modos de vibrar de fluido más bajos, según las ecuaciones 2, 3 y 9. Luego se colocan dos tubos horizontales que completan el conducto principal pero cuyo principal objetivo es estructural.

La masa del sistema estructural está representada por la masa de las propias tuberías y por el volumen de agua almacenada en las mismas. La elasticidad está definida por el tipo de sección y longitud de caños que se utilicen, el material de los mismos y los puntos de apoyo con los que se los vincule al sistema inercial o fijo.

El primer objetivo de diseño del banco es hacer coincidir las frecuencias naturales de ambos sistemas y que las mismas sean particularmente bajas. En pos de esto es necesario que el tubo sea esbelto y que el punto de mayor concentración de masa tenga gran capacidad de desplazarse (aumentar la masa y reducir la rigidez). La solución bajo este punto de vista consiste en conectar tres caños, uno vertical conectado a dos horizontales paralelos más cortos que el primero. De esta manera la mayor concentración de masa se encuentra en el vertical y los otros dos (si bien adhieren masa al sistema) representan la elasticidad del modelo oficiando de vigas empotradas.

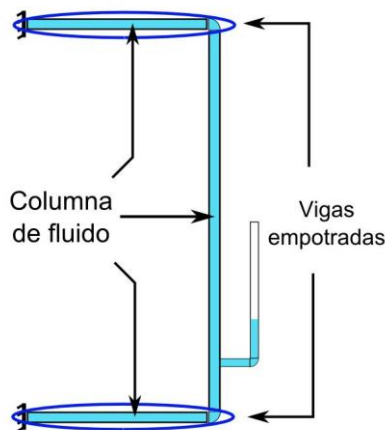


Figura 5: Configuración conceptual del banco de ensayos

De esta manera contamos con:

- Un sistema estructural
 - Elasticidad: Dos vigas empotradas-libre.
 - Masa: volumen encerrado por columna de agua y volumen de material de caños.

- Y un sistema de campo de fluido
 - Rigidez: Del conducto y de la compresibilidad de fluido.
 - Inertancia: Columna de agua asociada al flujo y área transversal.
 - Amortiguamiento: Fricción con paredes.

Las caracterizaciones de frecuencias naturales de los distintos sistemas se realizaron consecutivamente habilitando o deshabilitando los grados de libertad de cada sistema. La obtención de frecuencias de caudal en peso se logró empotrando el codo inferior de la tubería y realizando golpes de ariete a distintos niveles de presurización del tanque superior. Un golpe de ariete es un fenómeno que se produce al interrumpir el flujo en una tubería repentinamente. Se produce una onda de presión que viaja agua arriba hasta la fuente del flujo (tanque superior) seguida por una de depresión que se mueve aguas abajo hasta llegar al lugar donde se interrumpió la circulación. Si el fenómeno se repite de manera oscilatoria, debido al bajo amortiguamiento, lo hará en la frecuencia amortiguada del sistema [3]. Colocando un sensor piezoeléctrico en el codo inferior se pudo medir la evolución temporal del golpe de ariete y reconocer la frecuencia característica del sistema aislado.



Figura 6: Medición de frecuencias naturales de fluido por golpe de ariete

Resultados

Las mediciones de pulsación natural ante distintos valores de presurización y nivel de llenado del tanque superior no mostraron cambios. La elasticidad de los elementos no varía considerablemente bajo los niveles de presión utilizados. Si se eleva más la presión es probable que la deformación radial de la tubería esté afectada y eso modifique la elasticidad de las mismas ya que se aparta de las condiciones lineales. El nivel de llenado no modifica la pulsación natural ya que la inercia del líquido es grande (en comparación con la del caño) para ser desplazada por la de la columna de líquido perturbada en la tubería. Esta actúa como una condición de borde rígida. Si se hace un análisis similar con un nivel de líquido en el tanque casi nulo, se observa una disminución de la frecuencia natural debida a la reducción de la inercia del líquido contenido.

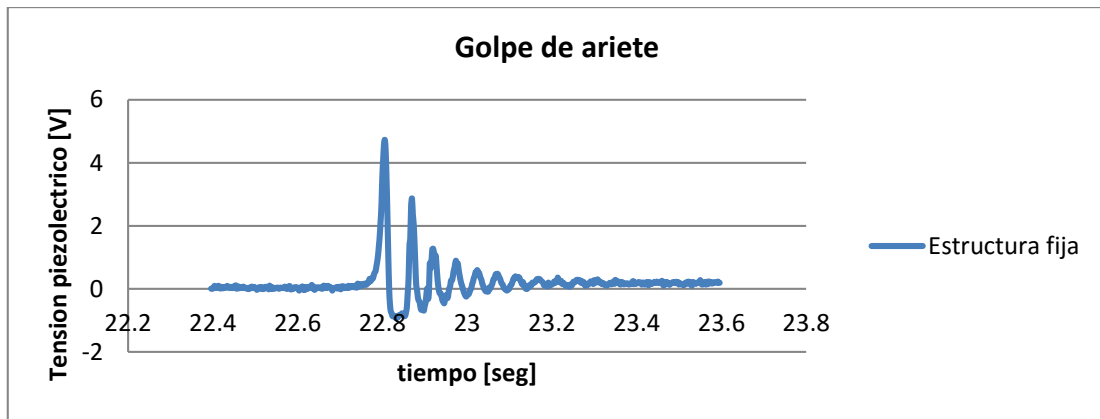


Figura 7: Evolución de la presión luego de un golpe de ariete

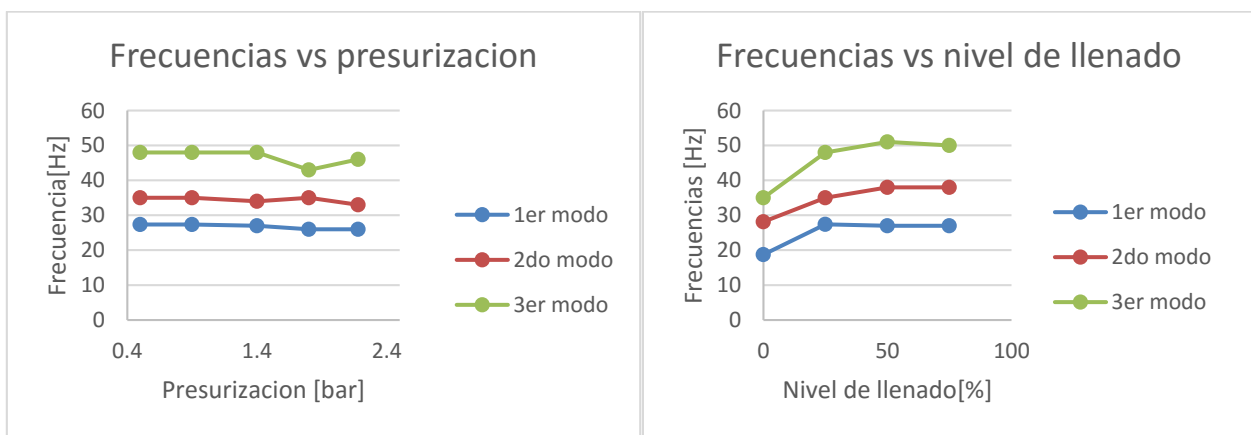


Figura 8: Variaciones de la frecuencia natural de fluido según variaciones de presurización (izq.) y nivel de llenado de tanque superior (der.)

El análisis de frecuencias naturales de la estructura se concibió filmando en cámara lenta el desplazamiento y midiendo las aceleraciones del codo inferior de la estructura al desplazarla de su posición natural llena de agua. Se realizaron varias de éstas mediciones variando el punto de apoyo del codo inferior. Para posiciones en las que el largo del caño inferior es menor las frecuencias naturales son más bajas. De esta manera se pudo encontrar la zona en la cual las frecuencias estructurales se acercan a las del fluido.

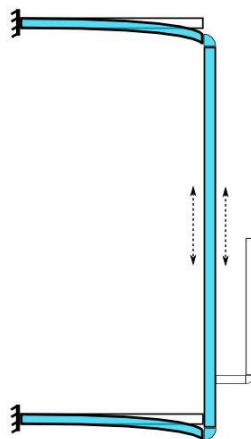


Figura 9: Oscilacion estructural, sin perturbacion de caudal.

Ante un desplazamiento del codo inferior se produce una oscilación subamortiguada de 2.3 Hz. Para acercar este modo a los 25 Hz (del sistema fluidodinámico) se modifica el punto de apoyo del caño inferior hasta que el largo del mismo sea lo suficientemente corto para lograr la condición de rigidez.

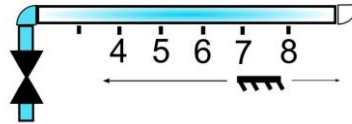


Figura 10: modificación del apoyo de caño inferior.

La posición óptima del apoyo está ubicada a 0.62m de la válvula inferior (primer empotramiento), generando una viga en voladizo de 0.38m. En esta situación se logró visualizar el acoplamiento de los sistemas. Ante iguales perturbaciones el tiempo de oscilación del fluido se prolonga a medida que las frecuencias coinciden.

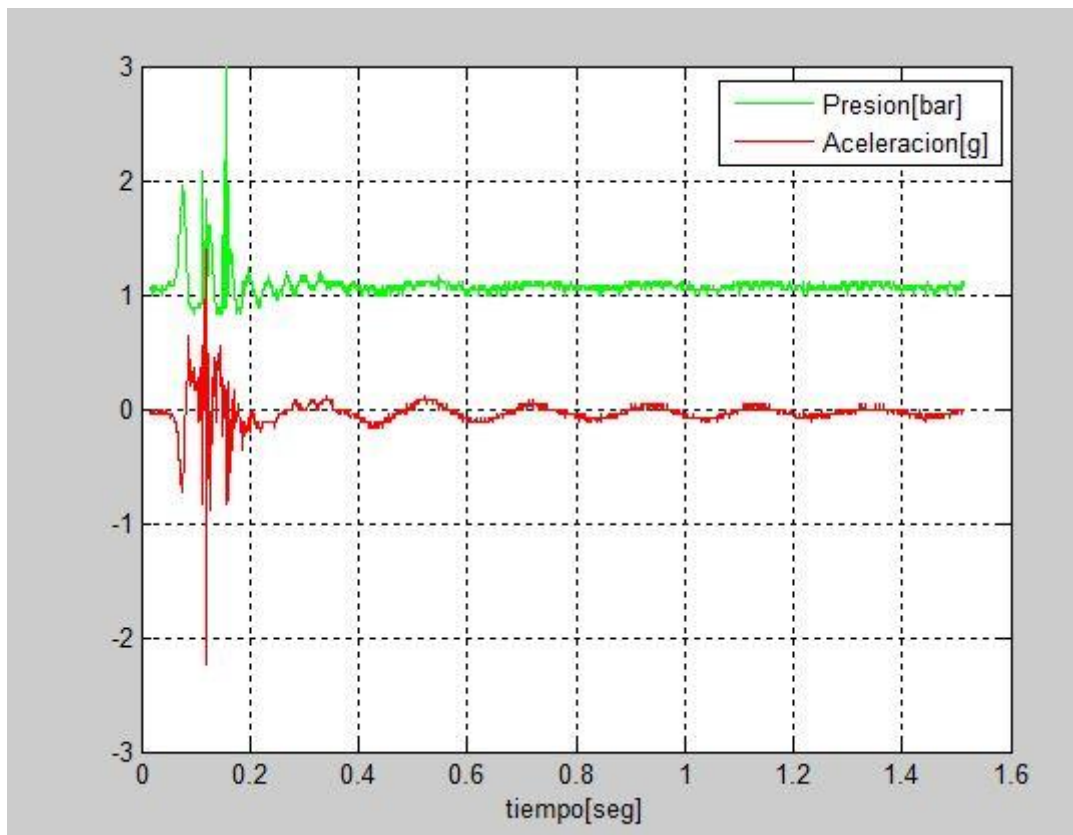


Figura 11: Oscilaciones de presión y caudal con la viga empotrada a 0.53 m

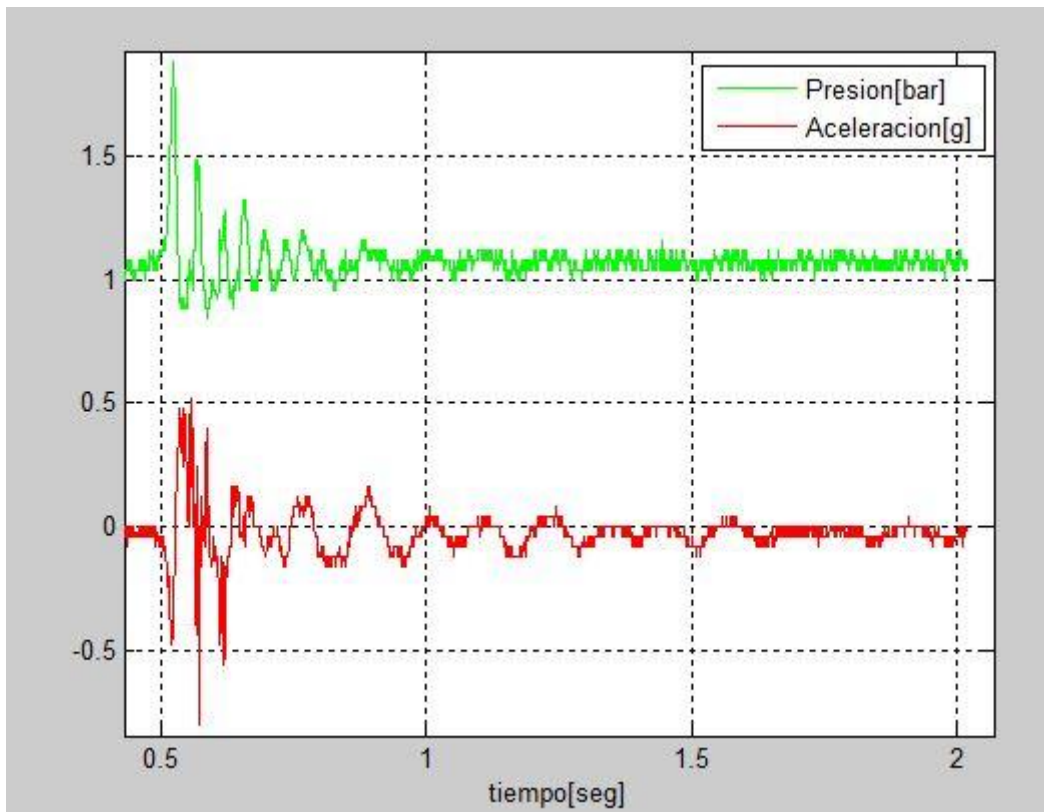


Figura 12: Oscilaciones de presión y caudal con la viga empotrada a 0.31 m

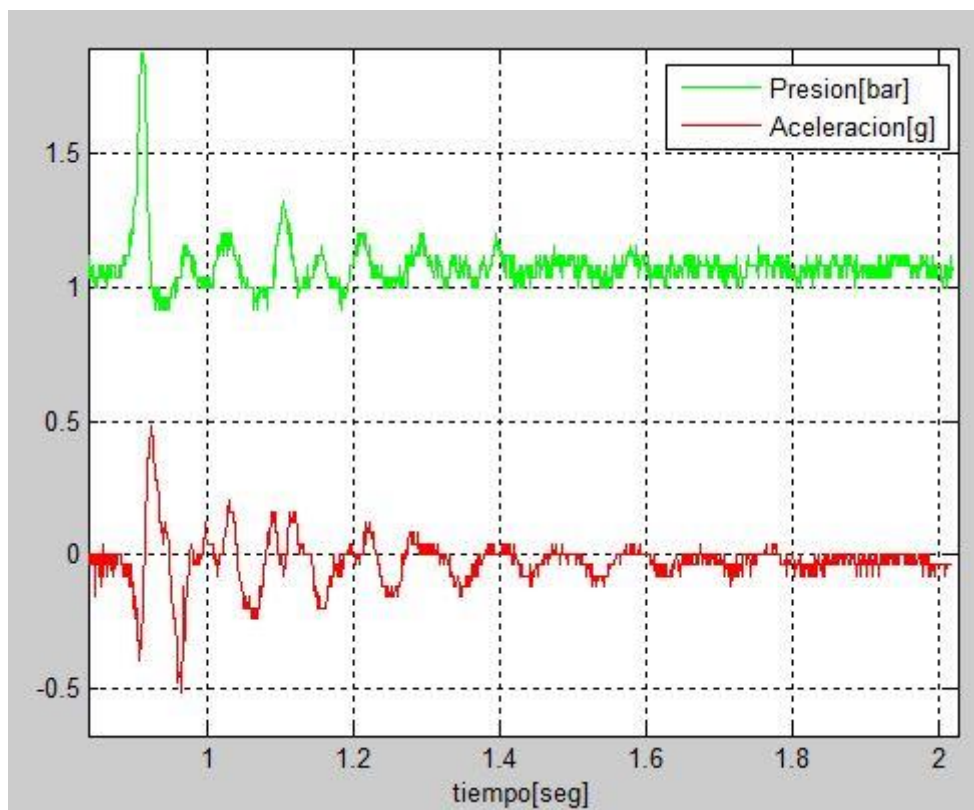


Figura 13: Oscilaciones de presión y caudal con la viga empotrada a 0.21 m

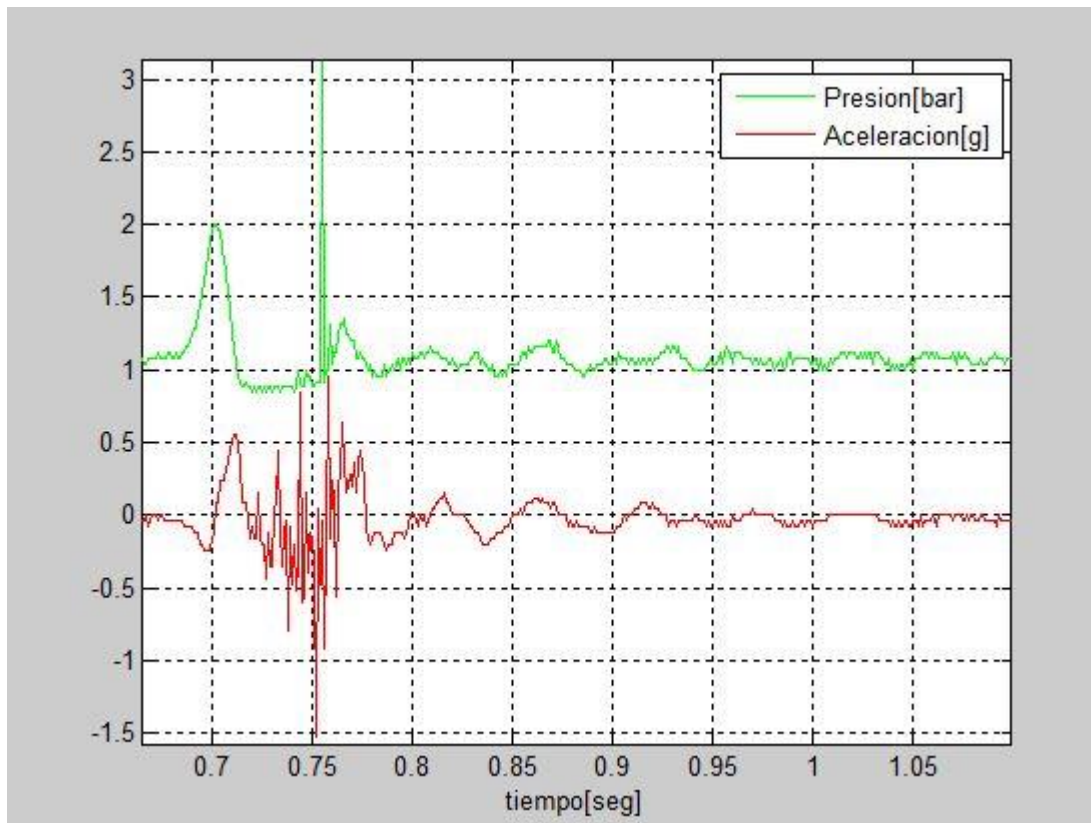


Figura 14: Oscilaciones de presión y caudal con la viga empotrada a 0.1 m

Las grandes perturbaciones que se observan al inicio de los gráficos se deben al golpe de ariete y a un error en el mecanismo de anclaje. El mismo cuenta con un huelgo generando impactos en el caño que se visualizan como ruido en las mediciones.

Acumulador

Una vez caracterizado el acoplamiento se realizaron corridas con y sin el acumulador activado, de cada perturbación se filmó y registró la oscilación de estructura y presión interna del conducto principal. Además, se evaluaron distintas secuencias de armado del acumulador para establecer la más eficaz a la hora de poder sintonizarlo en alguna frecuencia particular.



Figura 15: Dispositivo acumulador con válvula on-off de activación y conducto de presurización.

El análisis de energía de un golpe de ariete se realizó en la condición de mayor longitud del caño inferior para evitar el ruido presente en las mediciones anteriores Figura 11, Figura 12 y Figura 13. Por tal motivo se esperó visualizar las frecuencias de oscilación de estructura y de fluido por separado 2.5Hz y 25 Hz respectivamente.

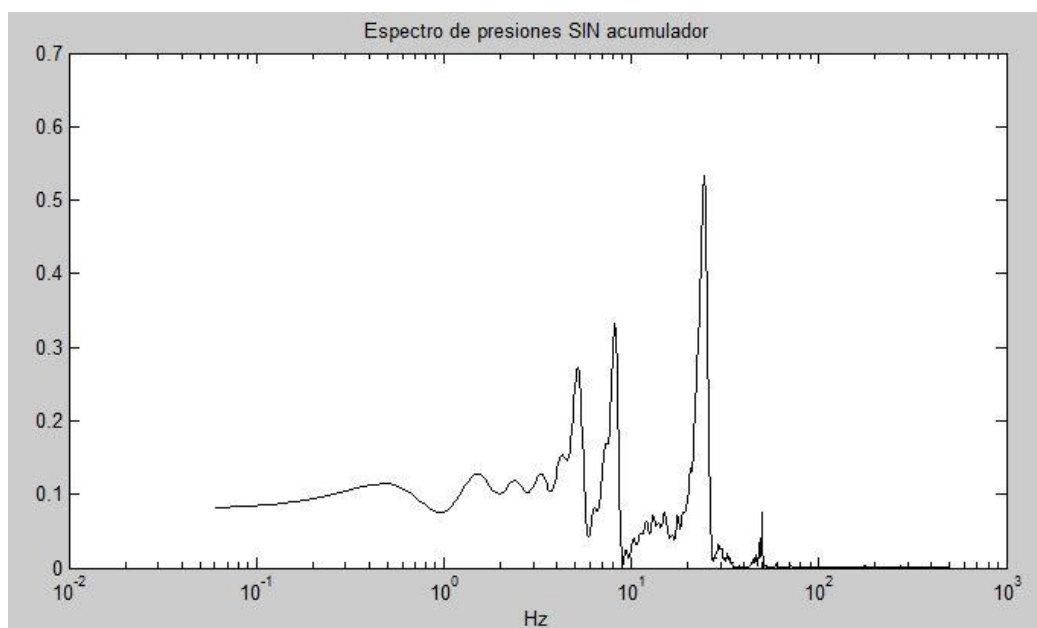


Figura 16: Espectro de oscilaciones de presión bajo un golpe de ariete.

Los picos del espectro más notables sugieren una gran concentración de energía en las oscilaciones de 2,5Hz; 8 Hz y 31.6 Hz pertenecientes al primer segundo y tercer modo de presión. La primera frecuencia esta evidencia las perturbaciones de caudal y presión por la inercia del líquido alojado. Al vibrar la estructura a 2.5Hz el volumen o masa de agua almacenada se acelera con la misma frecuencia y genera ondas de presión adquiribles con el sensor. Esta es una muestra fiel del acoplamiento dinámico existente entre ambos sistemas.

El acumulador se habilitó en varios niveles de llenado buscando variar la sintonización del mismo. Distintas columnas de agua dentro del mismo producen distintos valores de inertancia y por lo tanto deberían obtenerse distintas frecuencias. Se muestran a continuación los espectros luego de un golpe de ariete con habiendo habilitado el acumulador con distintas columnas de agua.

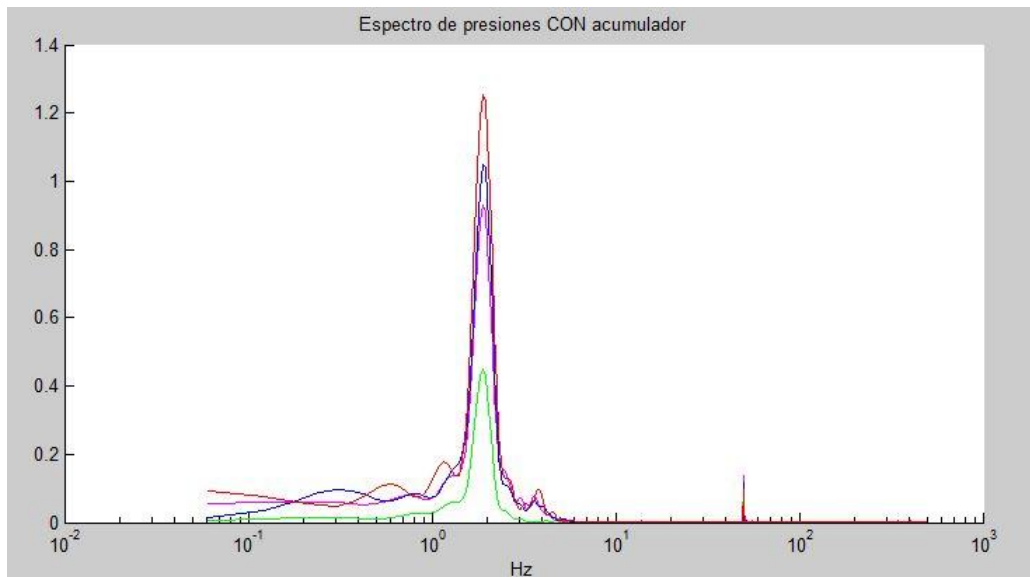


Figura 17: espectro de frecuencias de oscilacion de presion con acumulador lleno con distintas columnas de agua.

La dinámica pasa a estar dominada por la del acumulador en 1.25 Hz. Esto sucede porque ahora existe una gran burbuja de aire en un sistema líquido, entonces toda la energía de compresión que viaja por la tubería se ocupa de comprimir a la fase gaseosa en la frecuencia dominante de la misma. La variación de presiones de sintonización del elemento no parece modificar dicho modo. Esto puede deberse a que la misma diferencia de presiones de armado admite distintos niveles de columnas de agua, ya que el equilibrio entre la presión de línea y la de presurización necesita diferentes volúmenes de líquido. Es decir, al reducir la presurización, la columna de agua aumenta, pero la elasticidad baja manteniendo la relación que define a la pulsación natural.

Tras los resultados obtenidos se propone una alternativa de secuencia de armado que lleva a una sintonización distinta. La secuencia anterior propone presurizar el dispositivo aislado de la línea principal y luego admitir la columna de agua según ese estado de presurización. Entonces las dos variables dinámicas (inertancia y elasticidad) dependen de únicamente de la primera presión.

El segundo método de presurización es el siguiente:

1. Llenar la línea principal con la válvula de fluido cerrada. Mantener la presión interna del dispositivo en presión atmosférica.
2. Cerrar la válvula de gas y abrir la de fluido. Bajo estas condiciones el fluido ingresará al acumulador y comprimirá el gas hasta equilibrar la presión de línea. Esto admite una cierta columna de agua.
3. Abrir la válvula de gas y bajo la misma presión de la línea admitir el ingreso de fluido hasta que se ocupe la columna de fluido necesaria.

Los análisis del espectro del sistema bajo esta sintonización muestran un cambio en las frecuencias características.

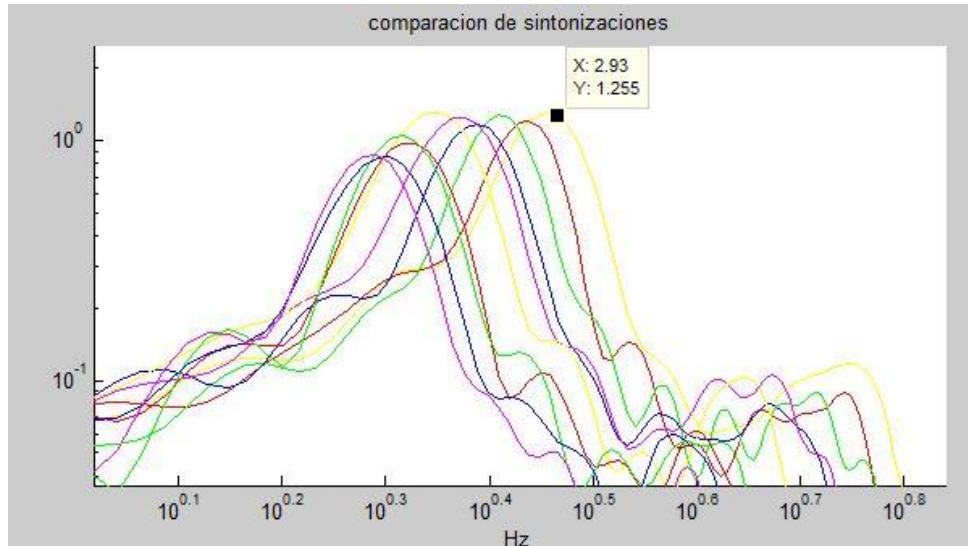


Figura 18: Variación en la sintonización del acumulador

De esta forma se puede variar la frecuencia de oscilación del sistema completo ante un golpe de ariete. Luego es posible alejar las frecuencias de fluido y las estructurales para mitigar problemas de naturaleza dinámica. La variación de las frecuencias lograda no es amplia, pero puede mejorarse a partir de diferentes dimensiones de acumulador.

CONCLUSIONES

Las mediciones de presión corresponden al codo inferior de la tubería y no al puerto del acumulador aislado. Entonces los cambios observados en los espectros solo indican que la dinámica del sistema entero está cambiando, es decir, no ofrecen una visualización de las características del acumulador sino del total del sistema. No obstante, es evidente que el acumulador actúa como un filtro pasa bajos. En conclusión, si se desea mitigar acoplamientos en alguna frecuencia determinada es conveniente sintonizar el acumulador por debajo de la misma.

La sintonización del acumulador se determinó teniendo en cuenta la equivalencia entre las presiones de línea y de acumulador, y la altura de columna de líquido alojada dentro del mismo. Estos valores corresponden a las frecuencias mostradas en el siguiente gráfico. Las mismas permanecen entre 9 y 11 Hz y son coincidentes con las frecuencias de corte de los espectros que se mostraron en la Figura 17.

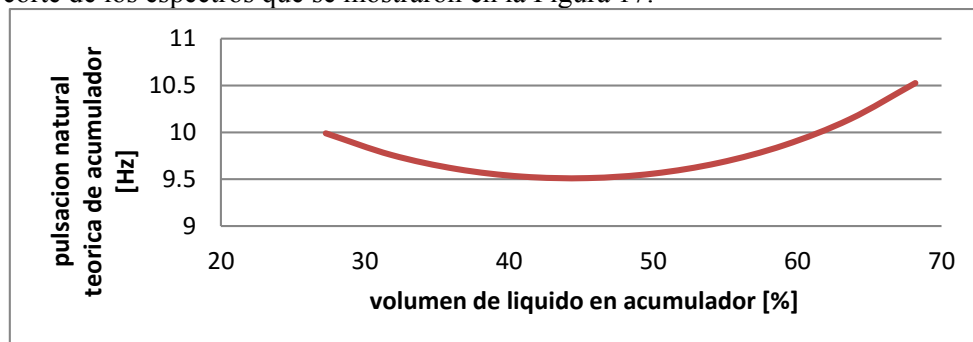


Figura 19: variación de frecuencia teórica de acumulador según llenado del acumulador

La comparación de los datos teóricos Figura 19 y los prácticos Figura 18 indicaría que existe una correspondencia entre los dos casos para columnas de agua que llenan desde un 50% a un 70 % del acumulador. A partir del quinto caso experimentado, en donde se llega a un 50% del acumulador a la misma presión de la línea, los resultados dejan de coincidir.

Si bien el segundo caso permite variar la frecuencia de corte o de máxima amplitud y evidencia la sintonización del dispositivo, el primer caso permite controlar fehacientemente los volúmenes de gas y fluido que se están poniendo en juego en el armado del sistema. La variación de la sintonización del acumulador, siguiendo

el segundo caso, no cubre un rango extenso de frecuencias. Por las razones expuestas se recomienda seguir el primer procedimiento y diseñar todo el dispositivo como un filtro pasa bajos.

REFERENCIAS

- [1] [L. y. Scarabino, Análisis de pogo en un sistema de combustible con turbobomba, La Plata: Tercer Congreso Argentino de Ingenieria Aeronautica , 2014.
- [2] [O. &. Rubin, Advanced Pogo Stability Analysis for Liquid Rockets, California : Journal of Spacecraft and Rockets, 1993.
- [3] [Cátedra de Fluidodinámica, Transitorio en instalaciones: Golpe de ariete, La Plata, 2010.